

02;10

Исследование влияния положительных ионов на СВЧ-генерацию в низковольтном виркаторе

© Р.А. Филатов, Ю.А. Калинин, А.Е. Храмов

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: slattern@nonlin.sgu.ru; noios@sgu.ru; aeh@nonlin.sgu.ru

Поступило в Редакцию 26 декабря 2005 г.

Экспериментально исследуется влияние вакуумных условий на характеристики СВЧ-колебаний в нерелятивистском электронном пучке с виртуальным катодом, формирующимся в тормозящем поле (низковольтном виркаторе). Показано, что ионизация остаточных газов в рабочей камере низковольтного виркатора приводит к вытеснению виртуального катода из пролетного промежутка и срыву СВЧ-генерации. Полученные экспериментальные данные подтверждаются численным моделированием.

PACS: 41.75.Ht, 84.30.Ng

В настоящее время активно изучаются источники СВЧ-излучения, использующие в качестве активной среды электронные пучки с виртуальным катодом (ВК) [1–4]. Одной из перспективных систем с виртуальным катодом, предложенных в последнее время, является схема низковольтного виркатора [5–7], в которой формирование нестационарного ВК в электронном потоке осуществляется за счет дополнительного торможения электронов в пространстве дрейфа. В подобной системе возможны формирование ВК и генерация хаотического широкополосного сигнала при малых токах и плотностях электронного пучка (в пучках, микропервеанс которых составляет величину $p_\mu > 3 \div 5 \mu\text{A}/V^{3/2}$ [5]), что делает возможным детальное экспериментальное исследование физических процессов в пучке с ВК с привлечением методов физического эксперимента в „классической“ электронике СВЧ [8]. Отметим, что низковольтный виркатор вызывает значительный интерес в качестве источника широкополосных хаотических сигналов среднего уровня мощности в сантиметровом и миллиметровом диапазоне длин волн [6].

Важной задачей исследования колебательных явлений в пучке с ВК является учет влияния положительных ионов на колебания пространственного заряда в потоке электронов с ВК. Наличие положительных ионов в пучке (которые возникают благодаря ионизации остаточных газов), с одной стороны, компенсирует пространственный заряд, тем самым препятствуя образованию ВК [3], а с другой — возбуждает дополнительные колебания ионов (релаксационные, плазменные, радиальные) [9], что приводит к уменьшению изрезанности в спектре мощности широкополосных хаотических колебаний ВК [5]. Также известно [10], что при инжектировании релятивистского электронного пучка со сверхкритическим током в рабочую камеру виркатора, заполненную газом низкого давления, сначала формируется ВК, в области которого происходит интенсивная ионизация газа (скорость электронов мала, а их концентрация в области ВК сильно превосходит концентрацию в плоскости инжекции). За счет появления положительного заряда ионов происходит зарядовая нейтрализация ВК, в результате чего он смещается по направлению движения пролетных электронов к выходной стенке трубы дрейфа. При достижении ВК выходной стенки рабочей камеры СВЧ-генерация в виркаторе прекращается. Эффекты, связанные с движением ВК в пространстве дрейфа виркатора, предложено использовать для ускорения ионов (см., например, [11,12]).

Представляется интересным рассмотреть влияние положительных ионов в пролетном промежутке на физические процессы в нерелятивистском пучке с ВК. Поэтому целью данной работы являлось экспериментальное и теоретическое исследование влияния остаточных газов на характеристики генерации низковольтного виркатора.

Экспериментальные исследования проводились с помощью схемы низковольтного виркатора, описанной в работах [5–7,13]. Аксиально-симметричный сходящийся электронный пучок, формируемый электронной пушкой, инжектируется в систему, состоящую из двух сеточных электродов с тормозящим полем. Тормозящее поле создавалось за счет подачи отрицательного (относительно входной (первой) сетки) потенциала V , на выходную (вторую) сетку. Выходной СВЧ-сигнал снимался с помощью отрезка спирали (широкополосный вывод энергии), который располагался в междусеточном пространстве (в области формирования ВК). Отработанный электронный пучок после прохождения второй сетки осаждался на коллекторе.

Основные параметры установки, при которых проводилось экспериментальное исследование, были выбраны следующими. Ускоряющее напряжение и ток электронного пучка составляли $V_0 = 3.0 \text{ kV}$ и $I_0 = 300 \text{ mA}$ соответственно; расстояние между сетками пространства взаимодействия $l = 50 \text{ mm}$, радиус пучка $r_b = 4 \text{ mm}$. Тормозящее напряжение было равно $V_r/V_0 = 0.5$, что соответствовало режиму развитой хаотической генерации прибора [5]. Исследования проводились в импульсном режиме при длительности импульса тока $\tau = 5 \mu\text{s}$ и скважности $Q = 100$. Наличие положительных ионов обеспечивается ионизацией остаточных газов в рабочей камере пучком электронов. Исследования проводились на разборной вакуумной установке при непрерывной откачке с возможностью изменения давления остаточных газов в пределах от 10^{-7} до 10^{-5} Torr .

На рис. 1 представлены спектры мощности колебаний в низковольтном виркаторе, полученные экспериментально при различных величинах давления остаточного газа. Спектральные характеристики СВЧ-сигналов измерялись с помощью спектроанализатора С4-60. На рис. 1, *a* показаны спектры генерации, наблюдающиеся при большом давлении остаточного газа $p = 5 \cdot 10^{-5} \text{ Torr}$. Из спектра хорошо видно, что в системе наблюдается несколько областей генерации в диапазоне частот $1 \div 2 \text{ GHz}$. С изменением параметров (например, тормозящего потенциала V_r или давления остаточного газа) число областей частот, в которых имеют место колебания, изменяется. В частности, на рис. 1, *a* отчетливо видны 4 зоны генерации.

Отметим также, что СВЧ-колебания ВК сопровождаются интенсивными низкочастотными колебаниями ионов в полосе частот от 100 kHz до 10 MHz , которые не представлены на спектрах мощности на рис. 1, *a*.

Физический механизм появления полос генерации может быть объяснен следующим. После того как ВК возникает в пространстве взаимодействия, начинается интенсивная ионизация остаточного газа (максимум коэффициента ионизации соответствует энергии электронов порядка $100\text{--}200 \text{ eV}$), в области ВК накапливается значительное число малоподвижных положительных ионов, которые компенсируют пространственный заряд пучка. В результате ВК постепенно вытесняется из пространства взаимодействия ко второй сетке, и СВЧ-генерация прекращается за счет исчезновения ВК. Далее имеют место процессы рекомбинации ионов, и при некоторой величине положительного пространственного заряда в системе снова формируется ВК, но теперь уже

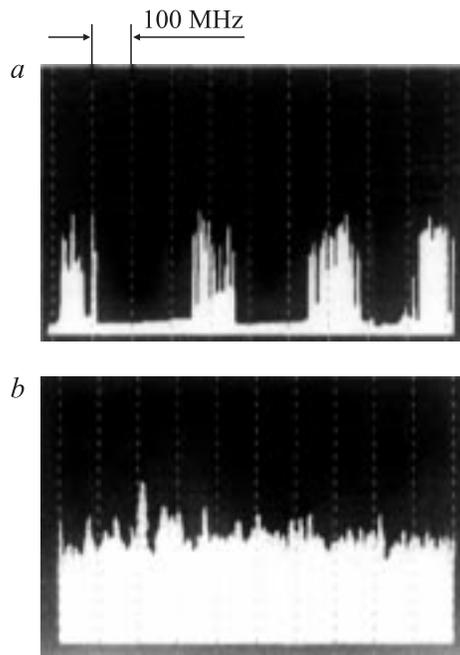


Рис. 1. Экспериментальные спектры мощности генерации низковольтного вивкатора, полученные при различных величинах давления остаточного газа: $a - p = 5 \cdot 10^{-5}$ Торг; $b - p = 10^{-7}$ Торг.

в новом месте межсеточного пространства, так что генерация возобновляется на новой частоте. Отсюда следует, что наличие остаточных газов (и, как следствие, генерация в системе положительных ионов) приводит к тому, что ВК существует некоторое конечное время жизни в пространстве взаимодействия, после чего генерация прекращается и далее через некоторый интервал времени (определяемый временем рекомбинации ионов) возобновляется, но уже в другом частотном диапазоне.

Описанная физическая картина подтверждается тем, что с уменьшением давления остаточных газов время жизни ВК увеличивается и отдельные зоны генерации начинают объединяться — спектр становится

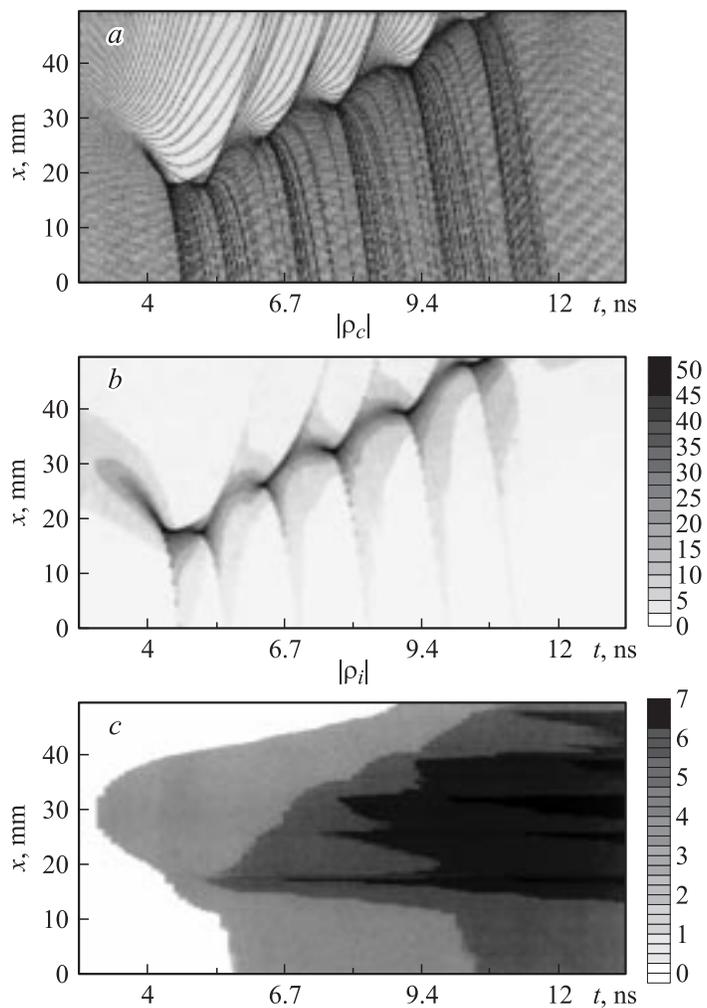


Рис. 2. Пространственно-временная диаграмма (а) и распределение плотности пространственного заряда электронного пучка (б), а также пространственно-временное распределение плотности заряда положительных ионов (с), численно построенные при давлении остаточного газа $p = 5 \cdot 10^{-5}$ Торр.

сплошным. Это иллюстрирует рис. 1, *b*, который построен при тех же параметрах, что и рис. 1, *a*, но при давлении остаточного газа $p = 10^{-7}$ Торр.

Детальный анализ физических процессов в электронном пучке с ВК в присутствии остаточных газов был проведен с помощью численного моделирования методом крупных частиц, как это делалось в работе [5]. В модели была учтена возможность ионизации остаточного газа в рабочей камере электронами, при этом учитывалась сильная зависимость коэффициента ионизации от энергии электрона, осуществляющего ионизацию [14, гл. 16]. В качестве остаточного газа в численном моделировании рассматривался азот, остальные параметры модели соответствовали экспериментальной установке. Был проведен численный анализ влияния давления остаточного газа на процессы формирования и колебаний ВК.

На рис. 2 представлены пространственно-временная диаграмма (*a*) и распределение плотности пространственного заряда электронов пучка (*b*), а также пространственно-временное распределение плотности заряда положительных ионов (*c*), которые были построены численно для большого давления остаточного газа $p = 5 \cdot 10^{-5}$ Торр, которое соответствует рис. 1, *a*.

На рис. 2, *a-b* хорошо виден процесс формирования ВК в пространстве дрейфа, который характеризуется сгущением траекторий частиц на пространственно-временной диаграмме и увеличением плотности пространственного заряда пучка. Одновременно, как видно из рис. 2, *c*, имеет место интенсивная генерация ионов в области ВК, где скорости электронов близки к нулю. Далее, по мере компенсации пространственного заряда ионами, плотность которых в области ВК увеличивается, происходит смещение ВК ко второй сетке, заканчивающееся вытеснением его из пространства взаимодействия, а следовательно, прекращением СВЧ-генерации в системе. Видно, что время жизни ВК в данном случае составляет порядка $6 \div 8$ пс.

Отметим, что при увеличении давления остаточного газа время жизни ВК, как показывает численное моделирование, монотонно растет, и при $p < 5 \cdot 10^{-7}$ Торр подавление колебаний ВК не наблюдается, что хорошо соответствует экспериментальным данным.

Работа поддержана РФФИ (проекты 05-02-08030, 05-02-16273), Программой поддержки ведущих научных школ РФ (НШ-4167.2006.2), CRDF (REC-006), а также ФНП „Династия“ и МЦФФ.

Список литературы

- [1] Диденко А.Н., Красик Я.Е., Перельгин С.Ф. и др. // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5. В. 6. С. 321.
- [2] Рухадзе А.А., Столбецов С.Д., Тараканов В.П. // Радиотехника и электроника. 1992. Т. 37. № 3. С. 385.
- [3] Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т. 2. М.: Физматлит, 2004.
- [4] Дубинов А.Е., Селемир В.Д. // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47. № 6. С. 575.
- [5] Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. и др. // Физика плазмы. 2005. Т. 31. № 11. С. 1009–1025.
- [6] Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Левин Ю.И. и др. // Изв. РАН. Сер. физич. 2005. Т. 69. № 12. С. 1724.
- [7] Калинин Ю.А., Храмов А.Е. // ЖТФ. 2006. Т. 76. В. 5. С. 25–34.
- [8] Калинин Ю.А., Есин А.Д. Методы и средства физического эксперимента в вакуумной СВЧ электронике. Саратов: Изд-во СГУ, 1991.
- [9] Колесников Е.К., Мануйлов А.С., Филиппов Б.В. Динамика пучков заряженных частиц в газоплазменных средах. СПб.: Изд-во С.-Петербургского ун-та, 2002.
- [10] Селемир В.Д., Дубинов А.Е., Птицын Б.Г. и др. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 22. С. 73–79.
- [11] Дубинов А.Е., Корнилова И.Ю., Селемир В.Д. // УФН. 2002. Т. 172. № 11. С. 1225–1246.
- [12] Дубинов А.Е., Селемир В.Д., Тараканов В.П. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. В. 4. С. 71–77.
- [13] Калинин Ю.А., Храмов А.Е., Трубецков Д.И., Егоров Е.Н. СВЧ генератор на виртуальном катоде: Патент № 46884 // Изобретения. Полезные модели: Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. М.: ФИПС, 2005. № 21.
- [14] Алимовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки. М.: Сов. радио, 1966.